

①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

①2 **Offenlegungsschrift**

①1 **DE 3037932 A1**

①1 Int. Cl. 3:
G01 R 33/02

②1 Aktenzeichen:
②2 Anmeldetag:
④3 Offenlegungstag:

P 30 37 932.9-35
8. 10. 80
15. 4. 82

**Vorläufiges
Eigentum**

DE 3037932 A1

⑦1 Anmelder:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten
Forschung e.V., 8000 München, DE

⑦2 Erfinder:

Theiner, Werner, Dr.rer.nat., 6600 Saarbrücken, DE; Becker,
Rainer, Dipl.-Phys., 6676 Ormesheim, DE; Dobmann, Gerd,
Dr.rer.nat.; Kopp, Harald, 6600 Saarbrücken, DE;
Repplinger, Wilhelm, Dipl.-Ing., 6638 Dillingen, DE;
Reimringer, Bernhard, Dipl.-Ing., 6634 Wallerfangen, DE;
Rodner, Christoph, Ing.(grad.), 6603 Neuweiler, DE;
Selzburger, Jürgen, Dipl.-Phys., 6680 Neunkirchen, DE;
Schorr, Peter, 6695 Tholey, DE; Waschkies, Eckehard,
Dipl.-Phys., 6607 Quierschied, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

①4 **Verfahren zur Feststellung der Koerzitivfeldstärken an ausgedehnten Oberflächen mit magnetinduktiven und
magnetoelastischen Meßgrößen**

DE 3037932 A1

BEST AVAILABLE COPY

Fraunhofer - Gesellschaft
zur Förderung der angewandten Forschung e.V.
München 19, Leonrodstr. 54

80/13481-IzFP

Patentansprüche

Verfahren zur Messung der Koerzitivfeldstärken (H_c) bei quasi-stationärer und dynamischer Durchsteuerung der Hysteresekurven mit magnetinduktiven bzw. magnetoelastischen Meßgrößen.

I) dadurch gekennzeichnet,

daß die Maxima der reversiblen Permeabilität (μ_{rev}) über der Tangentialfeldstärke (H_{it}) mit den Koerzitivfeldstärken $+H_c/-H_c$ zusammenfallen;

II) dadurch gekennzeichnet,

daß die Maxima der Überlagerungspermeabilität (μ_{Δ}) über H_{it} bis auf eine Abweichung $< 1/2 \Delta H_w$ (ΔH_w - endliche Wechselfeldamplitude, Spitze-Spitze) zu kleineren Koerzitivfeldstärken mit den tatsächlichen Koerzitivfeldstärkebeträgen zusammenfallen;

III) dadurch gekennzeichnet,

daß aus der Aufspaltung bzw. der Lage der Maxima des magnetischen Barkhauseneffektes über H_{it} bei polykristallinen technischen Stählen (keine Textur, große Gitterdefektdichte) die tatsächlichen Koerzitivfeldstärken bestimmt werden können (Hysteresekurve sollte hierbei ein normales Verhalten zeigen);

IV) dadurch gekennzeichnet,

daß die Minima der induzierten Ultraschallemissionssignale (akustischer Barkhauseneffekt) über H_{it} mit den Koerzitivfeldstärken $-H_c/+H_c$ zusammenfallen;

V) dadurch gekennzeichnet,

daß die Minima (positive Magnetostriktion in der Umgebung von H_c) oder die Maxima (negative Magnetostriktion in der Umgebung der Koerzitivfeldstärke) über H_{it} der Längsmagnetostriktion λ_L mit den Koerzitivfeldstärken übereinstimmen;

VI) dadurch gekennzeichnet,

daß aus der Aufspaltung bzw. der Lage der Minima bei Durchsteuerung des positiven und negativen Hysteresesastes mittels DMS- und EMUS-Aufnehmer aus der Lage der Minima bzw. aus der Aufspaltung der Meßkurven bis auf einen Wert $< \frac{\Delta H_w}{2}$ (ΔH_w - H-Feldstärke des infinitesimalen Wechselfeldes) über H_{it} die Koerzitivfeldstärken bestimmt werden können.

VII) Verfahren nach Patentanspruch 1

dadurch gekennzeichnet,

daß unterschiedliche Materialtiefen/-Volumina in den Meßgrößen erfaßt werden.

Verfahren zur Feststellung der Koerzitivfeldstärken an
ausgedehnten Oberflächen mit magnetinduktiven und
magnetoelastischen Meßgrößen

Die Koerzitivfeldstärke ist aus industrieller Sicht eine wichtige Zielgröße, die zur Unterscheidung von Werkstoffzuständen, Sortieren, etc. eingesetzt wird. Um die Koerzitivfeldstärke bestimmen zu können, muß der Prüfling bislang eine hochsymmetrische Geometrie (Zylinder, stabförmig, etc.) besitzen. Gemessen wird in diesem Fall die magnetische Flußdichte (B) über der inneren H-Feldstärke (H_i). Entsprechende Meßvorschriften sind bekannt /1,2/.

Die Erfindung betrifft die Messung der Koerzitivfeldstärke H_c an ausgedehnten Oberflächen, dabei versagen die bisherigen Meßmethoden, da die Flußdichtemessung (B) im Prüfling in der Aufsetztechnik keiner direkten Messung zugänglich ist.

Die bisherigen Verfahren nutzen, nachdem der Prüfling mit einem Permanentmagneten z.B. aufmagnetisiert wurde,

- eine lineare Korrelation Streufeldstärke (Remanenz) mit der Koerzitivfeldstärke (H_c). Dieses Verfahren versagt immer dann, wenn H_c nicht proportional mit der Remanenz korreliert ist /3/,
- die Kompensation der Streufeldstärke (Pol) mittels eines Gegenfeldes. Dabei wird die Streufeldstärke und die Gegenregerfeldstärke gemessen /4/.

Die beiden obigen Möglichkeiten haben sich bislang nicht durchgesetzt, da spezielle Eichprozeduren ausgenutzt werden müssen und eine starke Geometrieabhängigkeit besteht. Beim quasi-stationären und dynamischen Durchlaufen der Hysteresekurve erhält man, in Abhängigkeit der Ummagnetisierungsfrequenz, unterschiedliche Ummagnetisierungsverluste, die auch in sich ändernden Koerzitivfeldstärken H_c zum Ausdruck kommen. Diese

Koerzitivfeldstärken gilt es zu messen. Die einzelnen magnetinduktiven und magnetoelastischen Verfahren, ob reversibel oder irreversibel, nutzen die Gesetzmäßigkeiten in der magnetischen Bereichsstruktur bezüglich der am Ummagnetisierungsprozeß beteiligten Blochwandarten aus, um aus den einzelnen Meßgrößen bei einer Auftragung über der inneren Tangentialfeldstärke H_{it} , die Koerzitivfeldstärke H_c^{zu} bestimmen.

Die einzelnen Meßgrößen, sie unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Ortsauflösung, ihres Wechselwirkungsvolumens und ihren physikalischen Randbedingungen, sind:

-a- Die Überlagerungspermeabilität

$$\mu_{\Delta} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad \text{bzw. die}$$

reversible Permeabilität

$$\mu_{rev} = \lim_{H \rightarrow 0} \mu_{\Delta}$$

- b- das magnetische Barkhausenrauschen
- c- das akustische Barkhausenrauschen
- d- die elektrodynamisch angeregten US-Wellen (EMUS)
- e- die makroskopische Magnetostriktion (λ) bzw. $\Delta\lambda$

Die Meßbeträge aus -a- bis -e- werden in Abhängigkeit von der inneren Feldstärke H_{it} gemessen. Bei der H_{it} -Messung wird die physikalische Randbedingung, daß $H_t \text{ Material} = H_t \text{ Luft}$ gilt, ausgenutzt. Die Tangentialfeldmessung erfolgt mit einem H-Feldmesser (Hallsonde, Feldsonde, ...). Der schematische Meßaufbau ist in Fig. 1 dargestellt.

Die oben erwähnten Gesetzmäßigkeiten entnimmt man der Phasentheorie /5/, die für Eisenwerkstoffe in der Umgebung der Koerzitivfeldstärken eine stärkere Beteiligung von 180° Blochwandbewegungen, in den Hysteresecknibereichen eine starke Beteiligung von 90° Blochwandbewegungen und zu

noch größeren Feldstärken eine Zunahme von Drehprozessen am Ummagnetisierungsvorgang fordert.

Als weitere Gesetzmäßigkeit gilt, daß alle 180° Blochwände magnetostriktiv nicht aktiv sind, im Gegensatz zu den meisten 90° Blochwänden und allen Drehprozessen.

(Anmerkung: Bei anderen Werkstoffen, z.B. Nickel, sind andere als die hier erwähnten Blochwände am Ummagnetisierungsvorgang beteiligt; die Argumentation mußte in diesen Fällen entsprechend angepaßt werden.)

Bei der Erfindung wird somit die Gesetzmäßigkeit ausgenutzt, daß bei H_c schwerpunktmäßig 180° Blochwände am Ummagnetisierungsprozeß beteiligt sind. In den jeweiligen Meßgrößen der einzelnen Verfahren ist dies über H_{it} wie folgt abgebildet.

Erfinder: W.A. Theiner, R. Becker, Ch. Rodner, G. Dobmann, H. Kopp

-a- Überlagerungspermeabilität (μ_{Δ}) bzw. reversible Permeabilität (μ_{rev}):

Gemessen wird μ_{Δ} bzw. μ_{rev} mit gängigen Wirbelstrommeßgeräten, wobei die Impedanzänderung der Abtastspule oder des z.B. U-förmigen Ferritkerns hervorgerufen durch die μ_{Δ} bzw. μ_{rev} -Änderung über H_{it} gemessen wird. Um bei unterschiedlichen Materialien die Aufnehmer nicht immer anpassen zu müssen (Spulenwicklungszahl), muß die Wechselfeldamplitude ΔH_w frei wählbar sein. Durch geeignete Wahl der Frequenz f_w kann die Meßgröße μ_{Δ} bzw. μ_{rev} über H_{it} dem Betrag nach optimiert werden. Die Wirbelstrommeßfrequenz liegt hierbei in den Grenzen $50 \text{ Hz} < f_w < 1 \text{ MHz}$. Die Frequenz f_E , mit der die Hysterese durchsteuert wird $< 1000 \text{ Hz}$; f_w muß der Frequenz f_E angepaßt werden.

Aus der Peaklage ergibt sich bei der μ_{rev} -Messung die doppelte Koerzitivfeldstärke $2 H_C$. Das Maximum ist gekennzeichnet durch die in der Umgebung von H_C schwerpunktmäßig ablaufenden 180° Blochwandbewegungen. Bei normalen Hysteresekurven kann dieser Sachverhalt verallgemeinert werden.

Da die reversible Permeabilität definitionsgemäß nur im Grenzfall $\Delta H_w \rightarrow 0$ gemessen werden kann, wird im Anwendungsfall stets die Überlagerungspermeabilität μ_{Δ} gemessen.

Die Meßgröße ist in Fig. 2 zu sehen. Der Peakabstand beträgt hierbei $2 H_C - \Delta H_w$. Durch Messung der Wechselfeldamplitude ΔH_w in Luft kann der absolute Fehler abgeschätzt werden. In Fig. 3 ist die Eichprozedur zur Beschaffung der tatsächlichen H_C -Werte dargestellt. V_{SS} entspricht dem Spannungsspitze/-spitze-Wert der μ_{Δ} -Erregerspule in Luft. (Die Erreger- und Meßspule für das ΔH_w -Feld unterscheiden sich hinsichtlich der Wicklungszahl, befinden sich jedoch am selben Ort.) Wird die Erregerfeldstärke $\Delta H_w \sim V_{SS}$ verkleinert, so nimmt H_C zu (Fig. 3). Durch Extrapolation kann der Schnittpunkt mit der H_C -Achse bei $V_{SS} = 0$ bestimmt werden.

00.11.80

3037932

- 7 -

Das Verfahren ist verwendbar auf dünn- und dickwandigem Material.
Die gemessenen Koerzitivfeldstärken sind abhängig von den oberflächen-
nahen Materialeigenschaften, die Eindringtiefe wird bestimmt durch
die Wirbelstrommeßfrequenz f_w . Es sind keine Absolutmessungen von
 μ_Δ bzw. μ_{rev} notwendig.

Erfinder: W.A. Theiner, B. Reimringer, P. Schorr, H. Kopp

-b- Magnetinduktiver Barkhauseneffekt.

Gemessen wird die gleichgerichtete Barkhausenrauschamplitude.

Aufnehmer: Ferritkern, Luftspule, Tonbandkopf. Erregerfrequenz:

$f_E < 100 \text{ Hz}$; Analysierfrequenz $100 \text{ Hz} < f_A < 100 \text{ kHz}$.

Die Einhüllende der gleichgerichteten Barkhausenamplitude ist für den positiven und negativen Hysteresestart um die Hystereseseite getrennt. Tritt keine Anomalie der Hystereseschleife auf, so liegt bei technischen Stählen (polykristallin, keine Textur, ...) das Maximum der Rauschamplitude auf H_C (siehe Fig. 4) und wird durch irreversible 180° Blochwandbewegungen verursacht. Dies wird bei Stählen immer dann beobachtet, wenn das Maximum von χ_{diff} mit H_C zusammenfällt und eine hinreichende Irreversibilität auftritt. Andere Kurvenformen, aus denen allerdings ebenfalls die Koerzitivfeldstärke entnommen werden kann, treten bei weichmagnetischen Werkstoffen auf. Bei dieser Werkstoffgruppe ist, wenn eine geringe Defektdichte - die zu irreversiblen Ummagnetisierungsvorgängen führt - vorliegt, der Schwerpunkt der irreversiblen Ereignisse in die Kniebereiche verschoben. Die Hystereseseite der Rauschamplitude stellt dann bei positiver und negativer Durchsteuerung der Hysteresewerte und kleinen H_{it} -Feldern ein Maß für die doppelte Koerzitivfeldstärke $2H_C$ dar.

Eine Messung ist möglich an dünn- und dickwandigen Bauteilen. Die Meßgröße bezieht sich auf oberflächennahe Bereiche $\leq 1 \text{ mm}$.

Erfinder: W.A. Theiner, E. Waschkies, H. Kopp

-c- Induzierte Ultraschallsignale //
(akustischer Barkhäuseneffekt)

Gemessen werden z. B. die Effektivwerte der Rauschamplitude über H_{it} .
Aufnehmer: piezoelektrisch. Erregerfrequenz: $0.1 < f_E [Hz] < 1000$.
Das Minimum der Einhüllenden liegt exakt auf H_C (siehe Fig. 5).
In Fig. 5 ist neben den Quadraten der akustischen Rauschamplitude die Längsmagnetostriktion λ_L eingezeichnet. Wie der Fig. 5 zu entnehmen ist und wie aus der Phasentheorie auch abgeleitet werden kann, liegen die Minima beider Meßgrößen bei den gleichen H_{it} -Werten. Voraussetzung für die Nutzung dieser Meßgröße ist eine ebene H-Feldanströmung, oder anders ausgedrückt, eine definiert durchgesteuerte Hysteresekurve (keine Hysteresefamilie, die durch unterschiedliche H_C -Werte gekennzeichnet ist) und eine endliche Magnetostriktion. Das Minimum ist gekennzeichnet durch 180° Wandbewegungen, die keine akustischen Signale induzieren.

Da eine ebene H-Feldanströmung Voraussetzung ist, beschränkt sich dieses Verfahren auf Bleche und solche Geometrien, bei denen diese Anströmungsverhältnisse eingestellt werden können.

Das Wechselwirkungsvolumen/-Tiefe liegt im cm-Bereich.

Erfinder: W.A. Theiner, P. Schorr, H. Kopp

-d- Magnetostriktion /1,6/

Gemessen wird die Längsmagnetostriktion λ_L mit Dehnungsmeßstreifen (DMS) über der H_{it} -Feldstärke. Je nachdem, ob Trägerfrequenzverstärker oder Gleichspannungsverstärker eingesetzt werden, ist die Erregerfrequenz f_E nach oben unterschiedlich begrenzt. Da zur Meßgröße nur magnetostriktiv aktive Ummagnetisierungsprozesse beitragen, liegen wegen der schwerpunktmäßigen Beteiligung der 180° Blochwände die Minima der λ_L/H_{it} -Kurven auf H_C (Fig. 6a). In Fig. 6 ist nur der positiv durchgesteuerte Hysteresest dargestellt. Das Verfahren beschränkt sich auf Bleche bzw. Prüflingsgeometrien, bei denen eine ebene H-Feldanströmung möglich ist.

Wird dem quasistationären Erregerfeld H_{it} (z.B. $f_E = 0,1$ Hz) ein Wechselfeld ΔH_w (z.B. $f_w = 10$ Hz) überlagert, so kann man aus der Lage der ersten Minima - in der $\Delta\lambda$ über H_{it} -Darstellung, dynamische Magnetostriktion - in bezug auf die $H=0$ -Achse die Koerzitivfeldstärkewerte entnehmen (Fig. 6b). Die Einhüllende der $\Delta\lambda$ -Kurve ist durchgezogen und strichpunktiert gezeichnet, um die sich ebenfalls ändernde Phasenrichtung von $\Delta\lambda$ über H_{it} aufzuzeigen. Diese Information kann ebenfalls zur Bestimmung der Koerzitivfeldstärke genutzt werden. Je nach Wahl der f_w -Frequenz ist das Wechselwirkungsvolumen, also die mittlere Eindringtiefe, unterschiedlich. Bei exakten H_C -Bestimmungen sollte ebenfalls eine ebene Feldanströmung gewährleistet sein. Der maximal auftretende Fehler, wenn man aus der dynamischen Magnetostriktionskurve H_C entnimmt, beträgt $\Delta H_w/2$.

Erfinder: W.A. Theiner, H.J. Salzburger, W. Repplinger, H. Kopp

-e- Elektrodynamisch angeregter Ultraschall (EMUS) /8/

Gemessen wird die Ultraschallamplitude bzw. das magnetinduktive Rauschen. Die Erregerfrequenz f_E mit der die Hysteresekurve durchsteuert wird, liegt im allgemeinen im Bereich zwischen $1 \leq f_E [\text{Hz}] \leq 1000$. Die Wechselfeldfrequenz f_w sowie die Meßfrequenz f_m liegen im Bereich zwischen 10 kHz und 5 MHz.

Wird die Ultraschallamplitude als Meßgröße genutzt, so ist eine endliche Magnetostraktion des Materials Voraussetzung. In der Umgebung von H_C sind reversible - wenn die ΔH_w -Amplitude zu groß ist auch irreversible - magnetostraktiv aktive 90° Blochwände abgebildet.

Die Einhüllenden der Meßkurven sind wieder um die Hystereseeöffnung voneinander getrennt. Die H_C -Werte können nun aus dieser E-Hystereseeöffnung entnommen werden oder aus der Lage der Minima (Lage der zur $H_{it}=0$ nächstgelegenen Minima). Diese Minima entsprechen der Meßgröße unter -d- bzw. Abb. 6b. Die Phaseninformation kann ebenfalls wie unter -d- ausgeführt herangezogen werden.

Der Fehler in der H_C -Bestimmung ist wie in -a- oder -d- durch die Wechselfeldamplitude ΔH_w gegeben, es werden also $H_C - 1/2 H_w$ Werte gemessen.

Wird das magnetinduktive Rauschen (b), das ebenfalls mit dem EMUS-Wandler gemessen werden kann, genutzt, wird die H_C -Bestimmung wie unter (b) durchgeführt.

Es werden oberflächennahe Koerzitivfeldstärken gewichtet gemessen; entsprechend kann die magnetische Abschlußbereichsstruktur den Meßbetrag beeinflussen.

08.10.80

3037932

- 12 -

Literatur

- /1/ E. Kneller; Ferromagnetismus. Springer, Berlin 1962
- /2/ C. Heck; Magnetische Werkstoffe und ihre technische Anwendung.
Hüthig, Heidelberg 1974
- /3/ F. Förster, G. Zizelmann; Z. Metallkde. 45 (1954), Heft 4
- /4/ List Magnetik, Firmenschrift, Aufsatzkoerzimeter KM2
- /5/ A. Seeger; Probleme der Metallphysik. Springer, Berlin 1966
- /6/ B.D. Cullity; Introduction to Magnetic Materials.
Addison-Wesley, 1972
- /7/ Offenlegungsschrift 28 37 733, W. Theiner, E. Waschkies
- /8/ Auslegungsschrift P 26 55 804.3-52, W. Mohr et al.

Nummer:
Int. Cl.³:
Anmeldetag:
Offenlegungstag:

3037932
G01 R 33/02
8. Oktober 1980
15. April 1982

08 10 80

3037932

19.

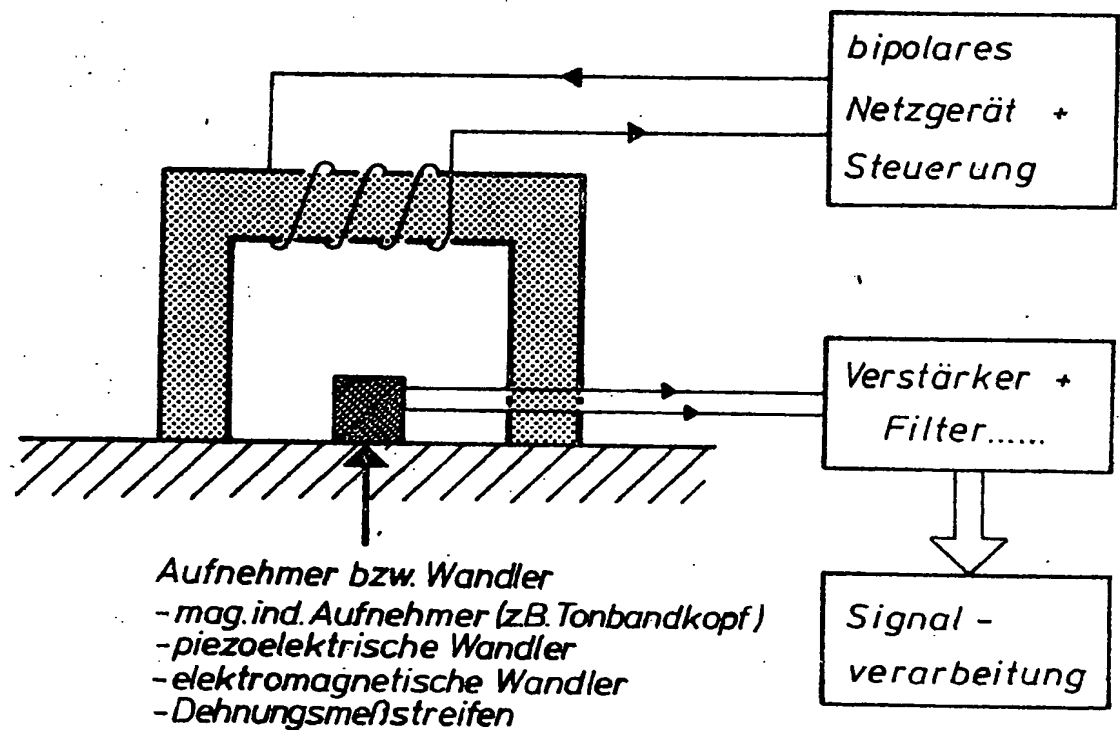
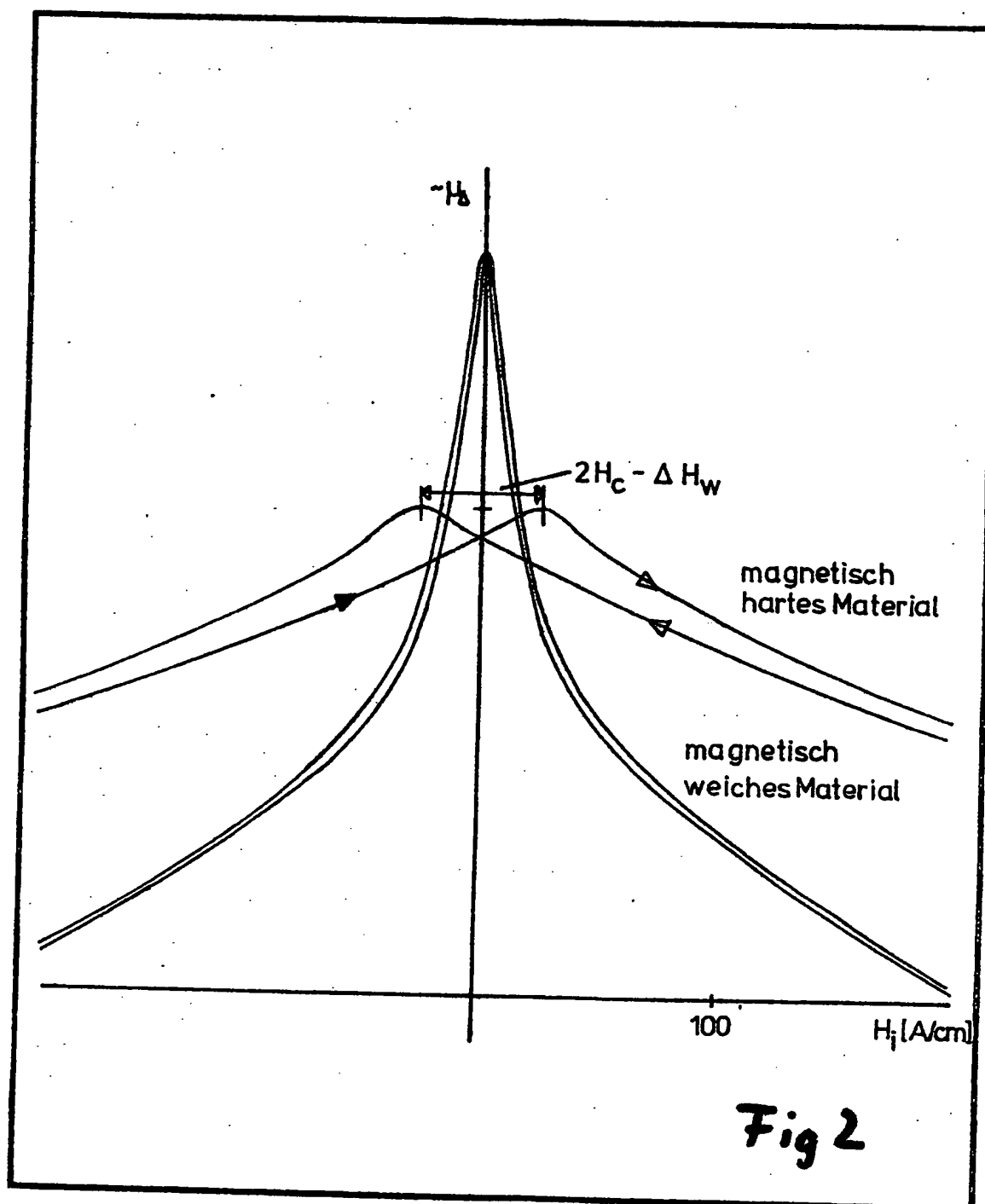


Fig. 1

08-10-80

13

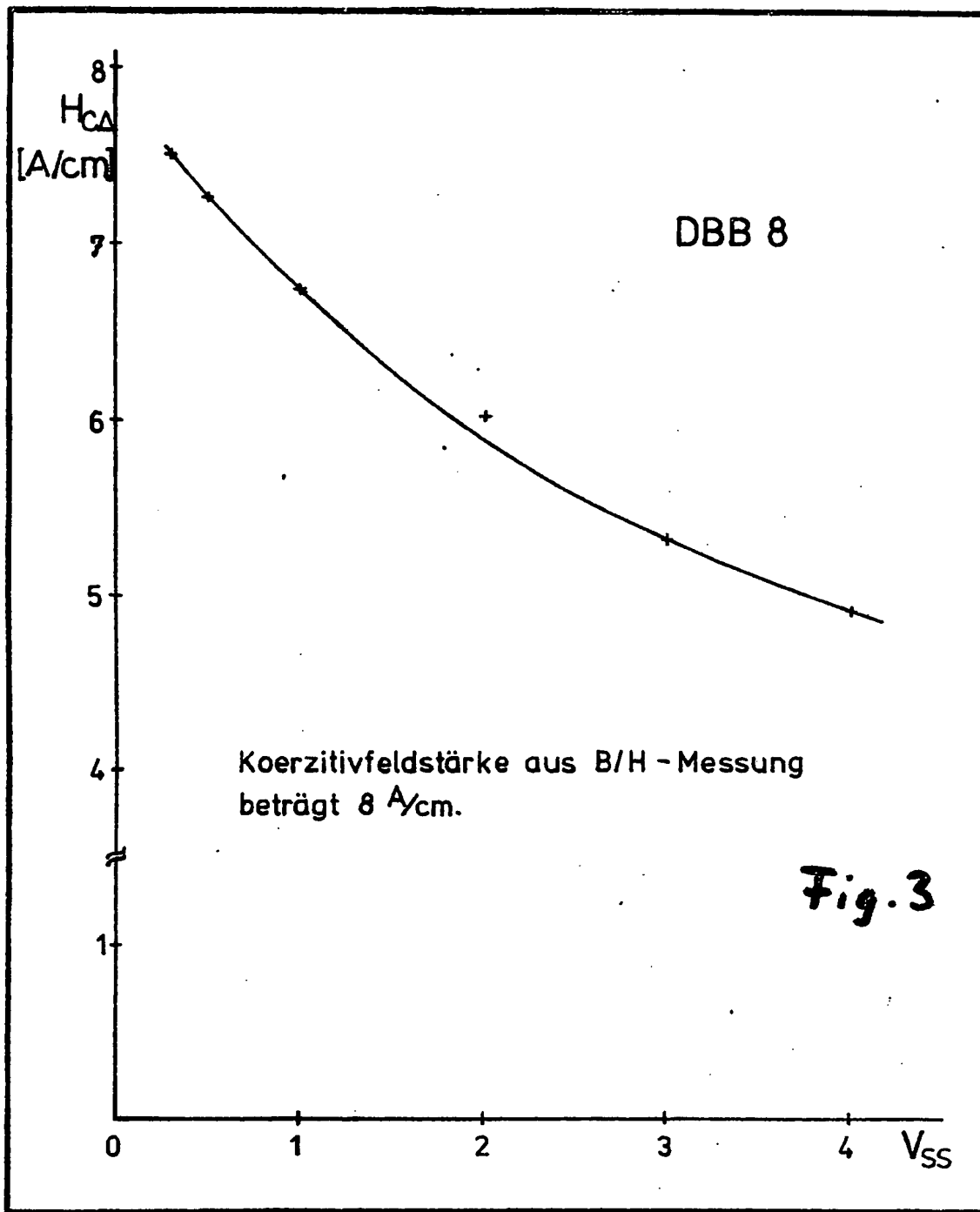
3037932



08.10.80

14.

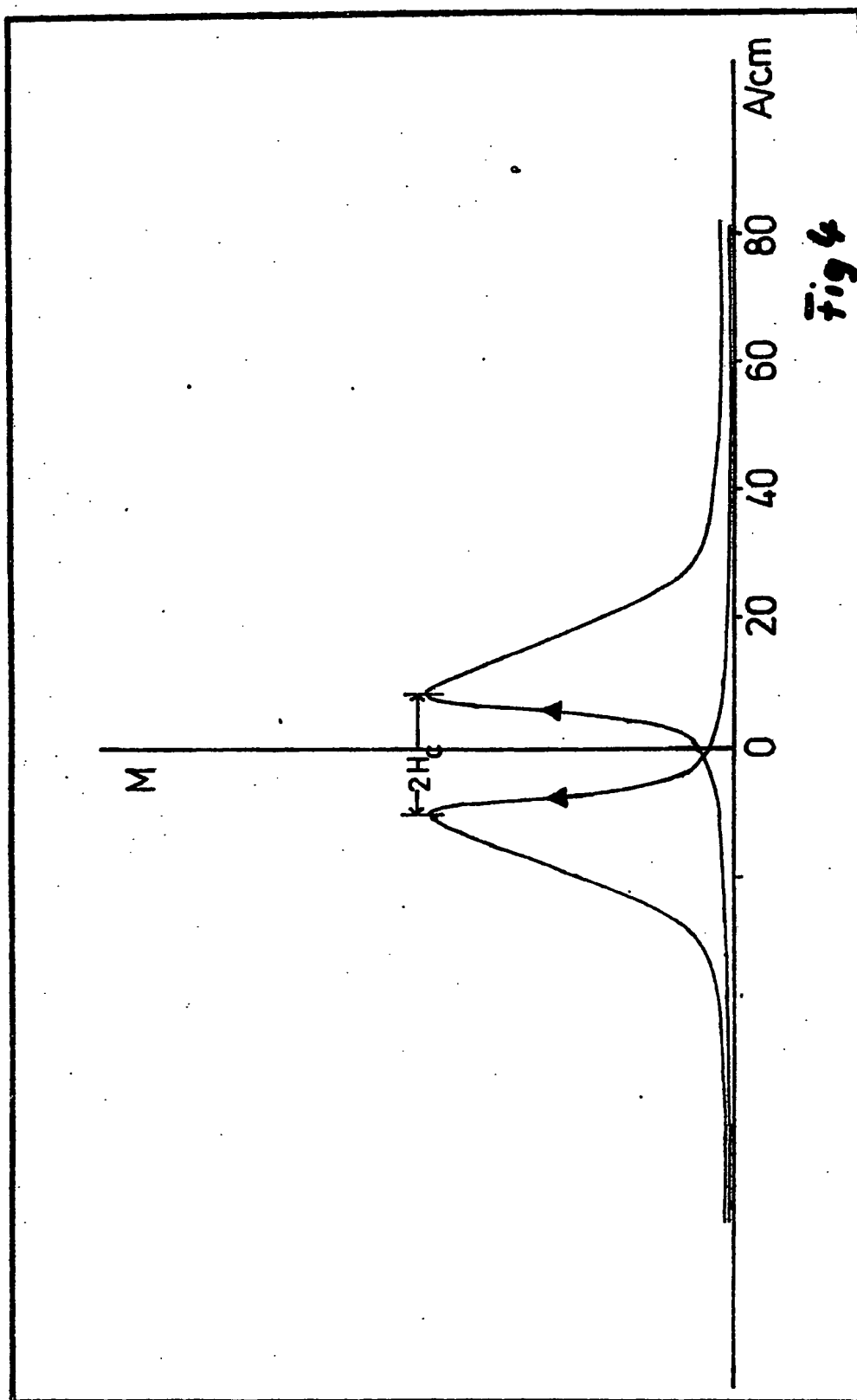
3037932



08 10 80

15.

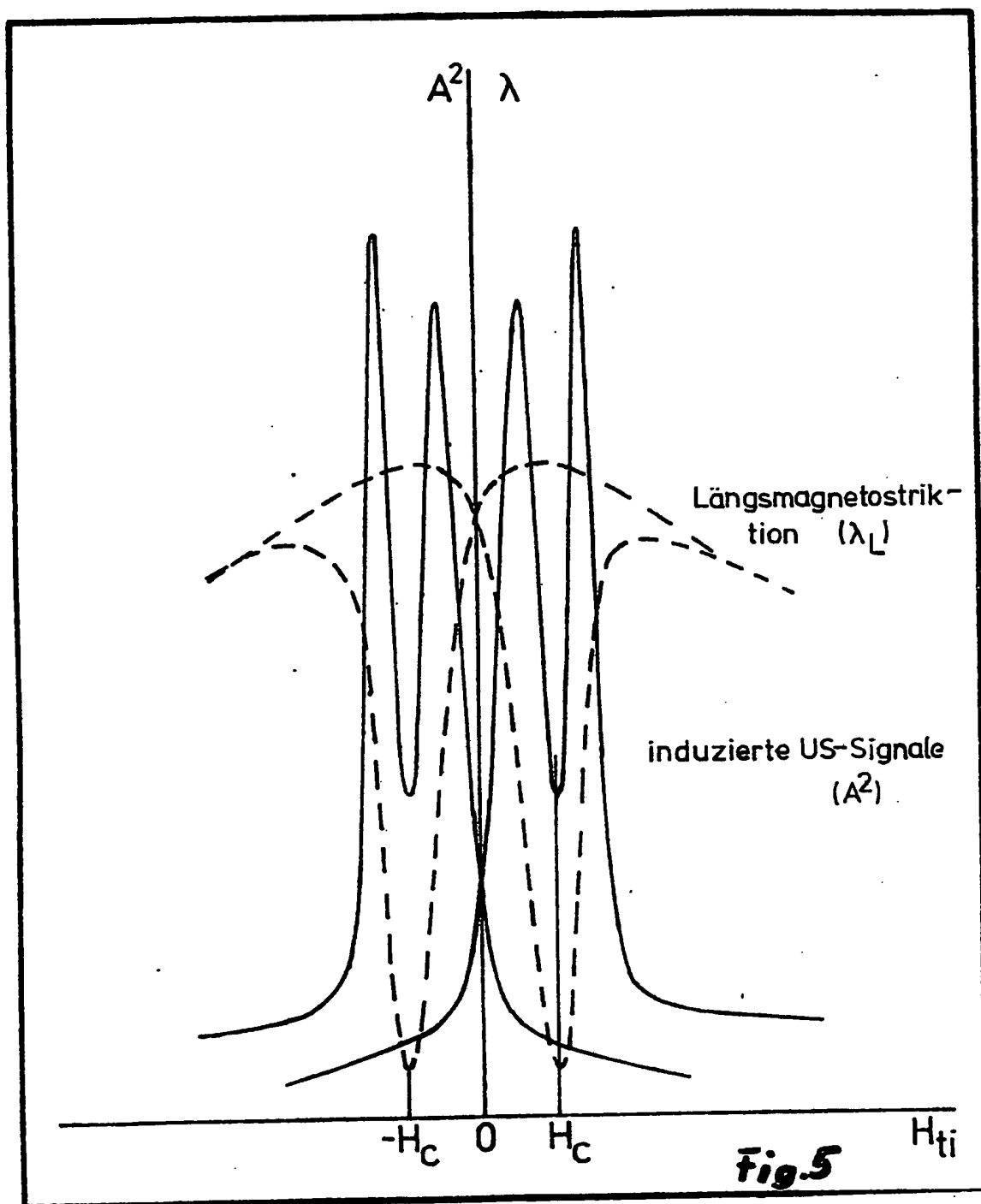
3037932



08.10.80

3037932

16



08-10-80

3037932

17.

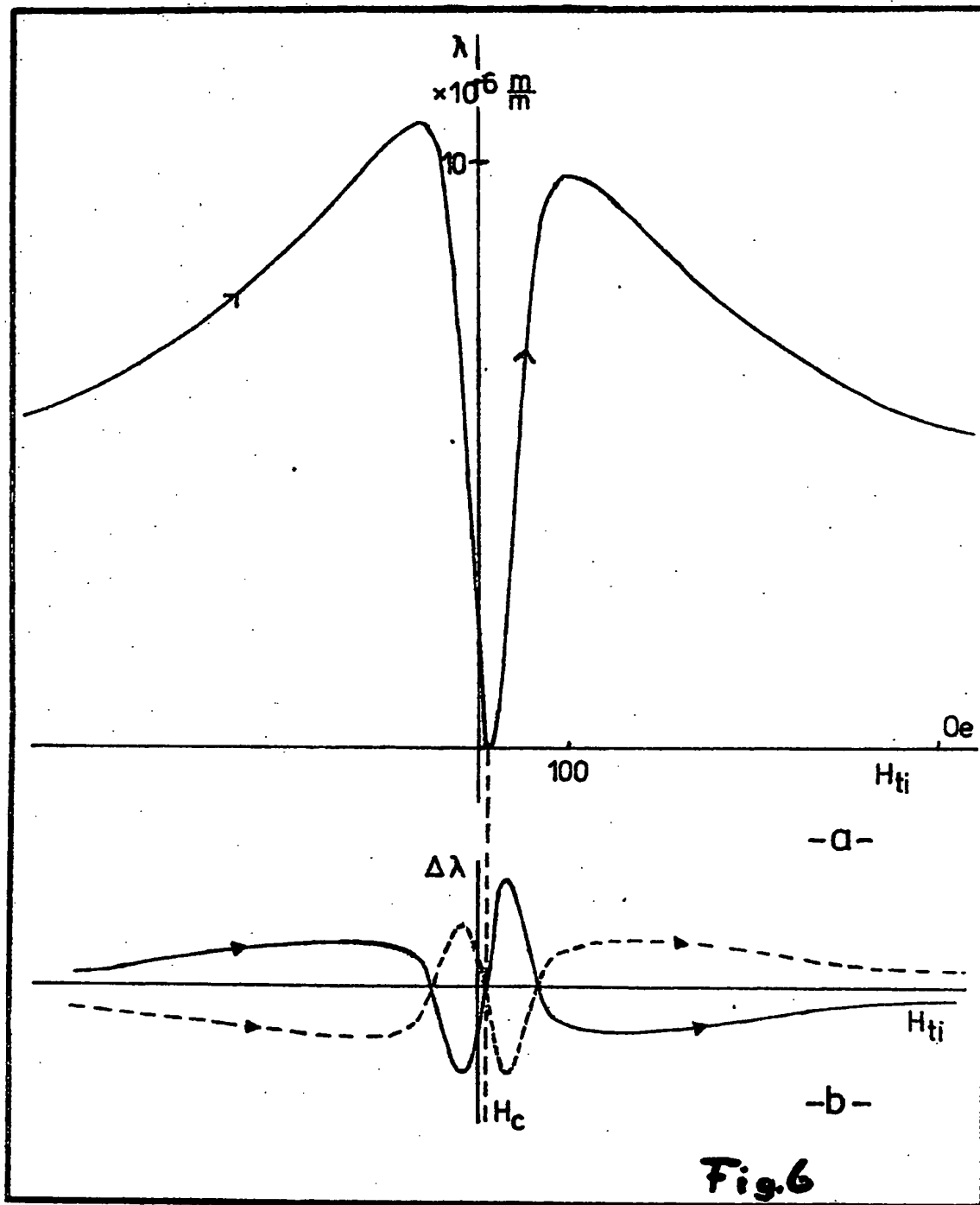


Fig.6

08-10-80

18.

3037932

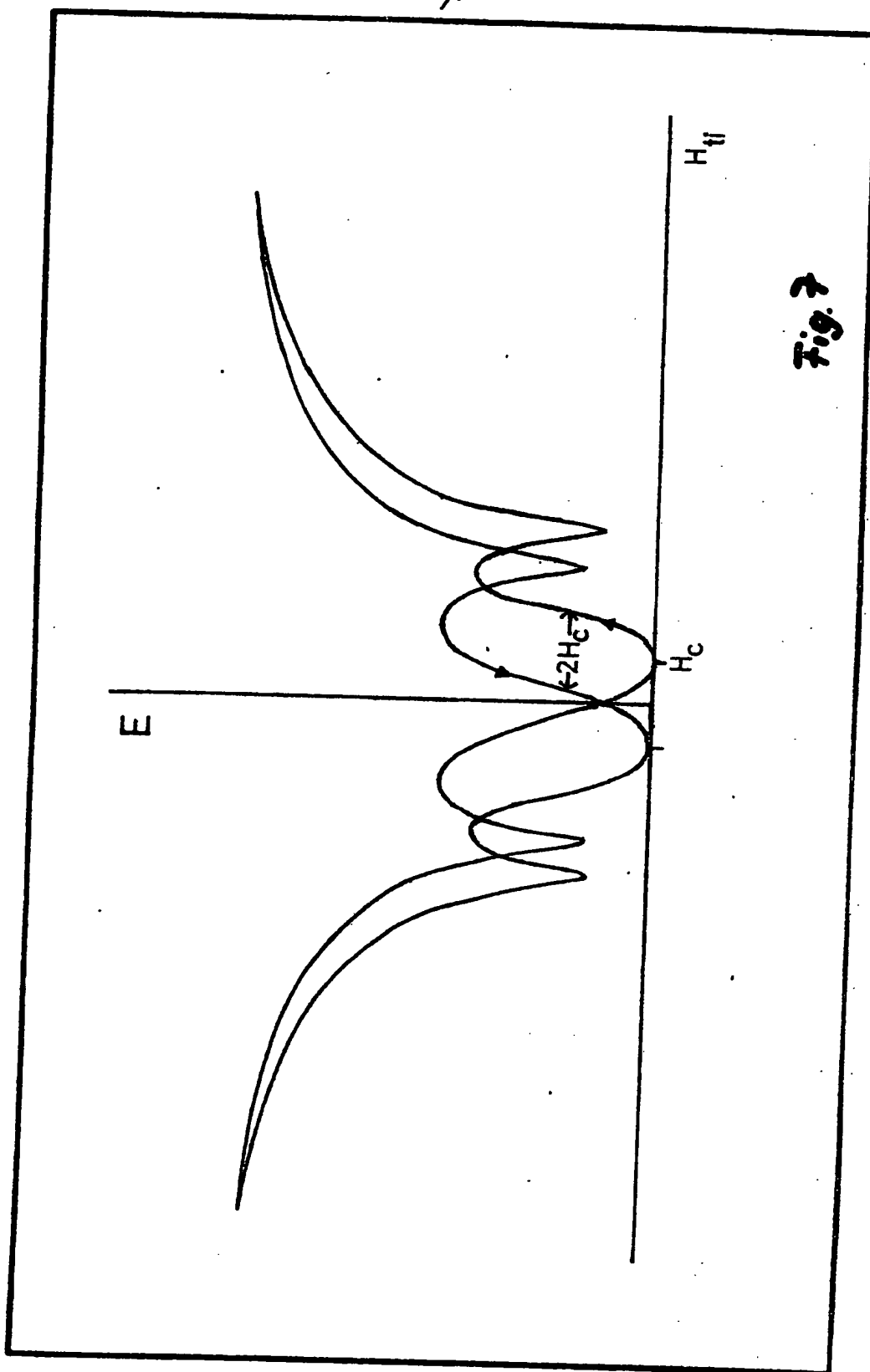


Fig. 7

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.